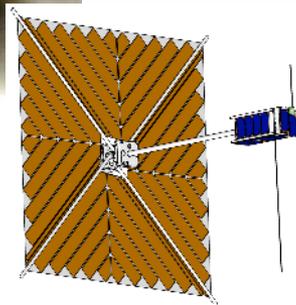
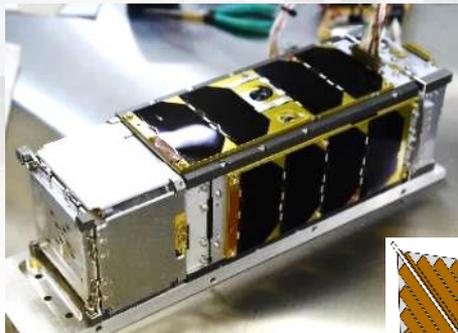




展開膜構造を用いた超軽量・高収納率な リフレクトアレーアンテナ技術

○坂本啓, 戸村崇, 森谷元喜, 小池修平, 竹田有希, 田村真也,
永井和希, 金丸宙, 武田裕貴, 中山弦, 柳虎乃介,
白根篤史, 岡田健一, 他OrigamiSat-2開発チーム
東京工業大学

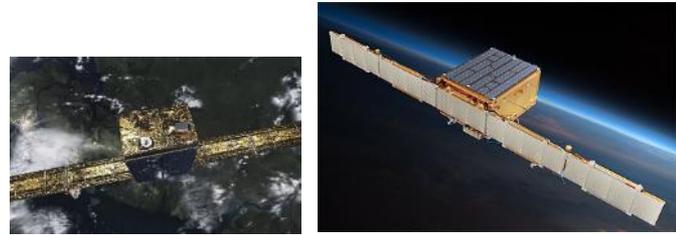


背景：宇宙展開アンテナの活用 = 超小型衛星上での大型化

アンテナ面積拡大 → 高利得化 (= 通信高速化・大容量化・距離増大)

① ICEYE-X1 (フィンランドICEYE社)

70kg 衛星、展開式SAR、
約1.6m² (3.25m×0.5m)

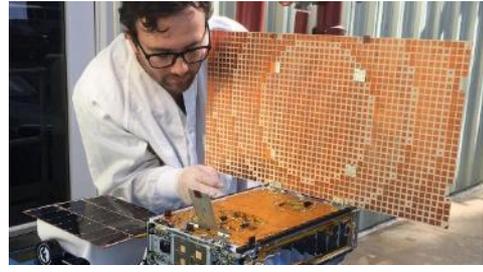


2018打ち上げ、リモートセンシング事業拡大中

©ICEYE

② MarCO (NASA JPL)

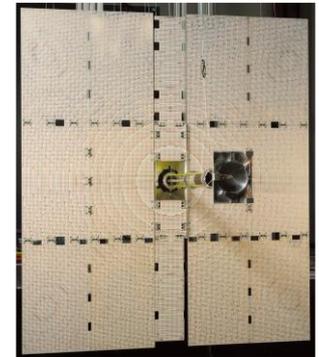
13kg 衛星、展開式リフレクトアレーアンテナ、
約0.2m² (0.6m×0.3m)



2018打ち上げ、火星軌道から通信

©NASA

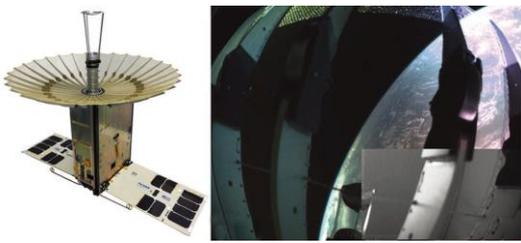
③ OMERA (JPL) 開発中



(Sauder et al., 2019)

④ RainCube (JPL)

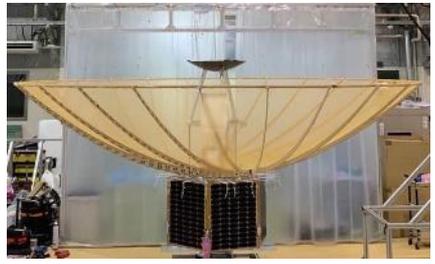
12kg衛星、パラボラ、
口径0.5m



(Chahat, et al., 2016)

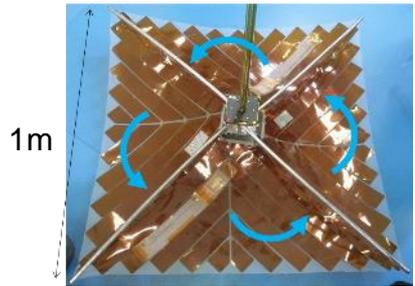
⑤ イザナギ (QPS研究所)

100kg衛星、パラボラ、口径3.6m



© QPS研究所

展開膜によるアレーアンテナ
大幅な軽量化・高収納率化 → 大型化



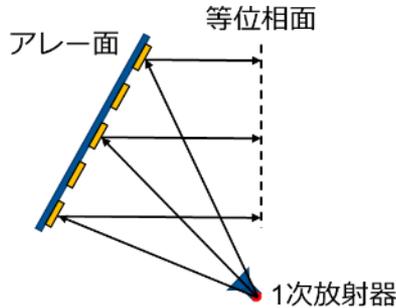
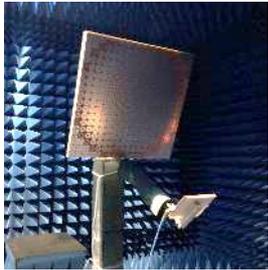
→ 数10m級

OrigamiSat-1多機能展開膜 (2019)
265g (1m×1m)

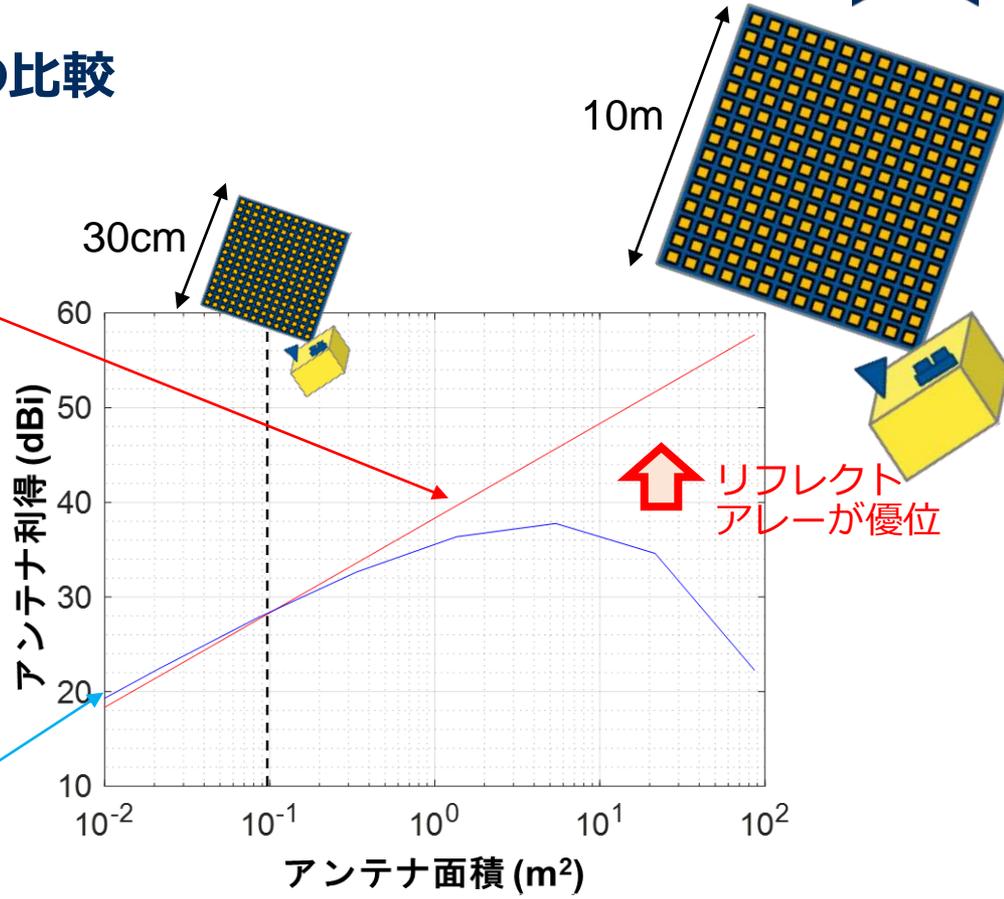
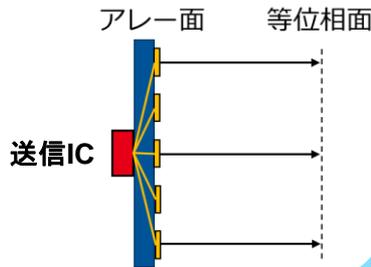
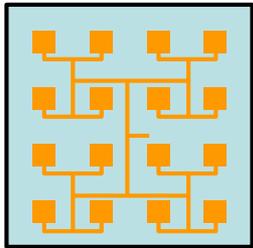
リフレクトアレー：大型化に適する様式

リフレクトアレーとパッチアレーの比較

リフレクトアレー



パッチアレー

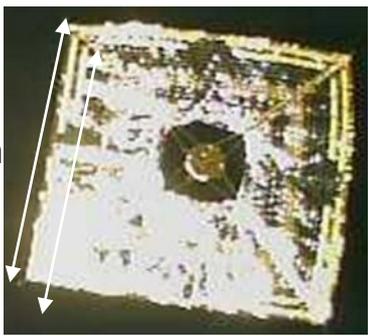


- **リフレクトアレー**：給電損失**無し**・開口効率80%
- **パッチアレー**：給電損失**有り**・開口効率**100%**

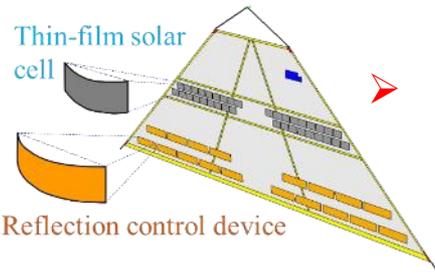
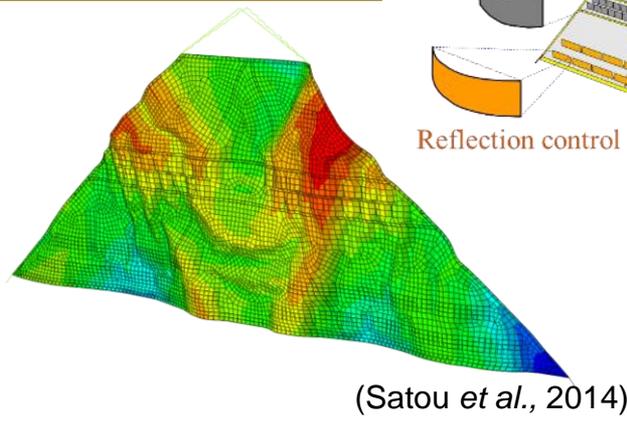
アンテナ面積0.1m² (32cm×32cm)、利得30dBi以上ではリフレクトアレーが優位

平面度の高い展開膜構造実現は困難 (重量増の要因)

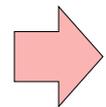
ソーラー電力セイルIKAROS (2010)



©JAXA

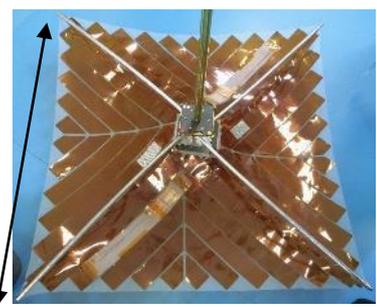


➤ 膜上のデバイスが熱変形・脱湿etcで反る
→ 大きなしわが膜全体に伝播

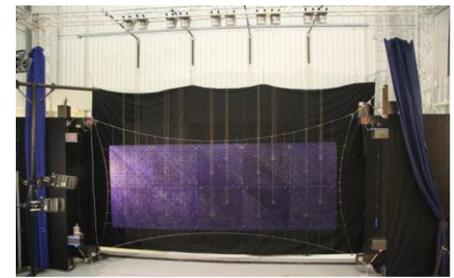
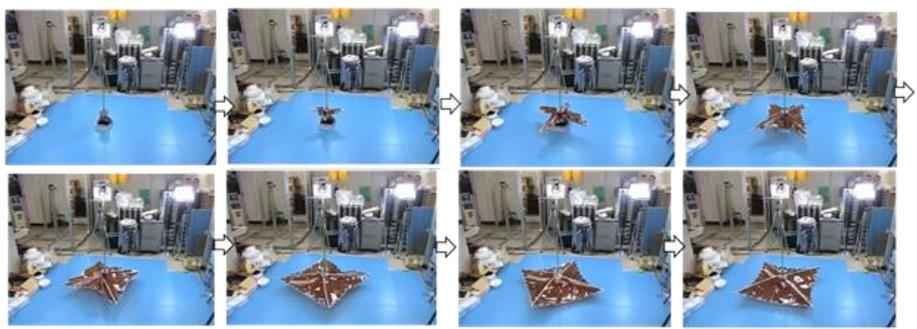
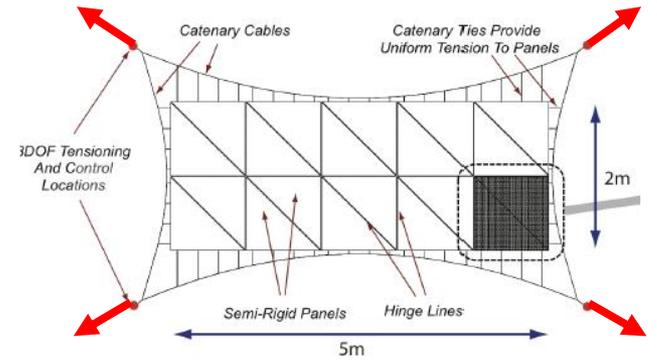


膜へ大きな張力？
→ 剛な構造 + 追加機構を要し
軽量・高収納率でなくなる

3UキューブサットOrigamiSat-1 (2019)



➤ 膜展開中に膜が張ってしまうと展開完了が困難
→ 展張機構が別に必要

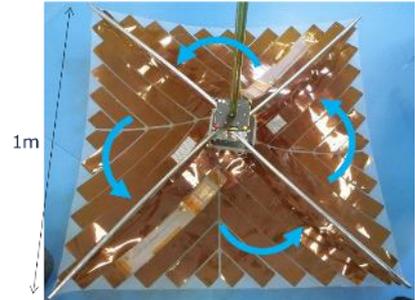


(Footdale, 2012)

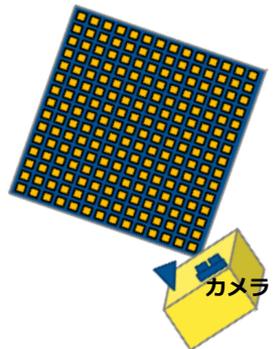
非平面に適応する展開膜リフレクタレーアンテナ

- ✓ 展開後、膜の平面度が低いままとしてはどうだろう？
- ∴ 展張後はわずかな張力のみ

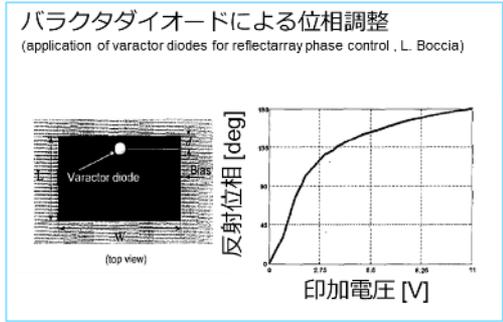
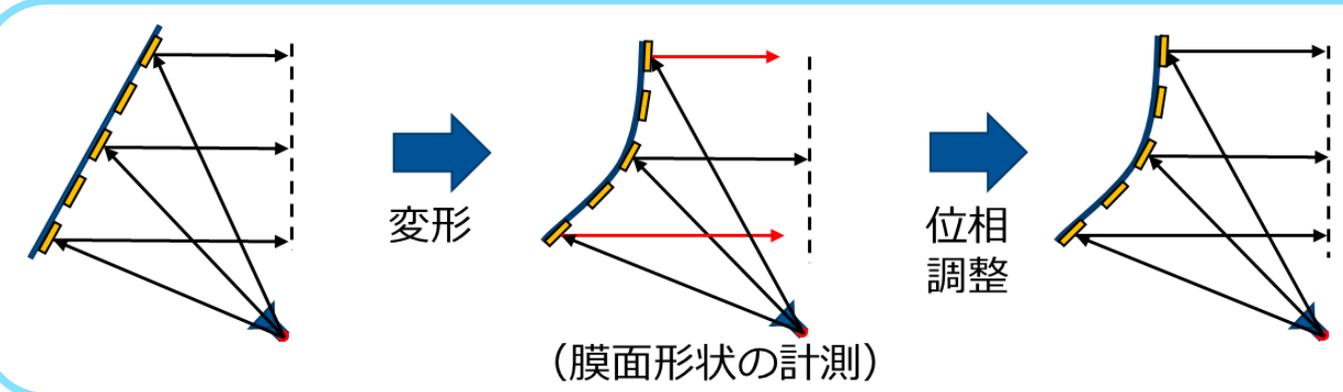
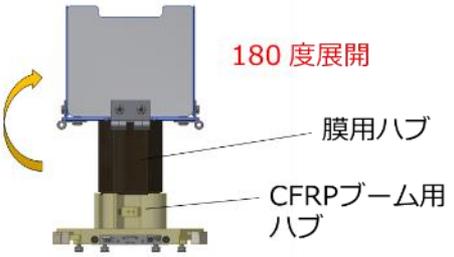
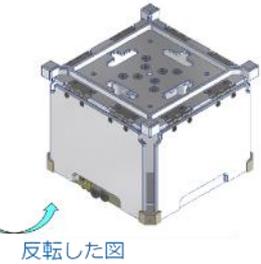
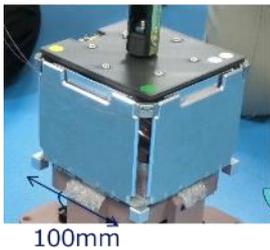
➡ 構造の大幅な簡素化（軽量化）



例：OrigamiSat-1展開機構



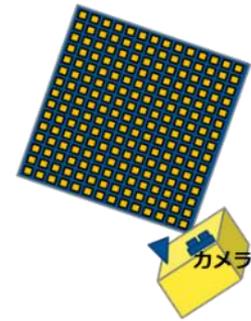
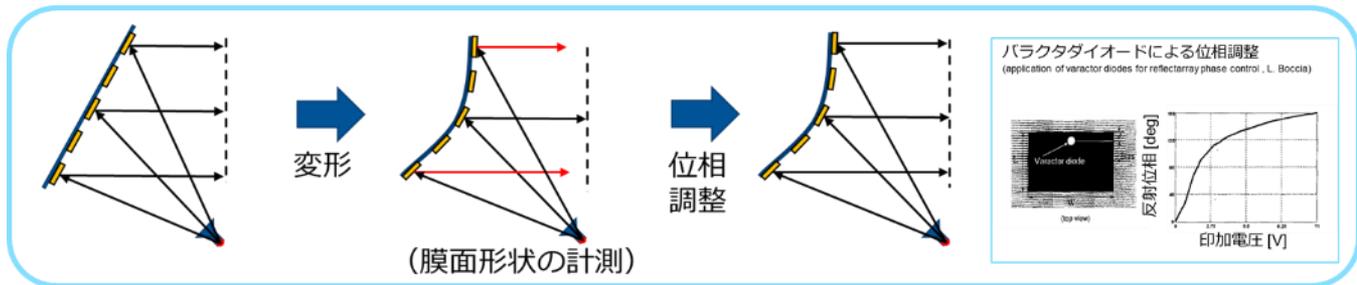
膜面上での位相調整の提案



これまで：位相のずれを構造を剛にすることで対応 → **重量増**
提案：膜上での電氣的補正 → 構造の**大幅な軽量化・高収納率化**

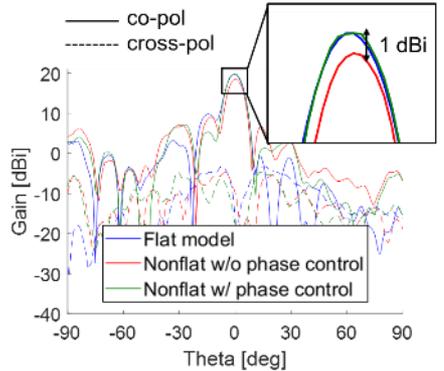
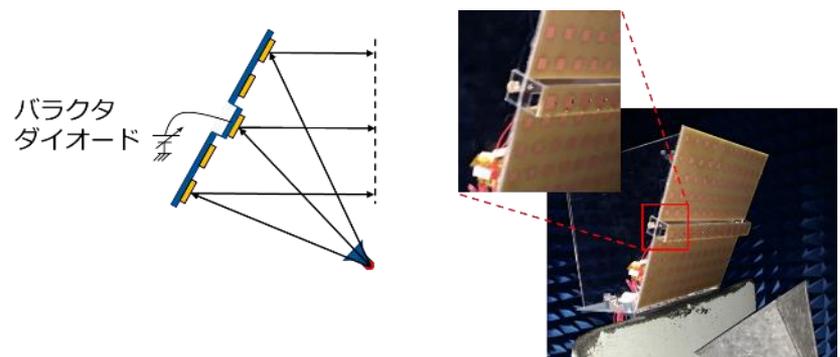
非平面適応型 展開膜 リフレクトアレーアンテナ

これまでの成果 (1 / 2)

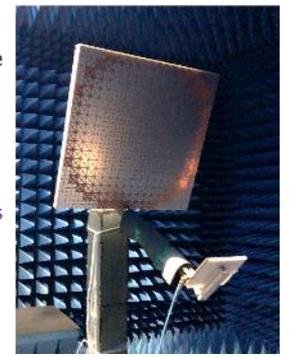
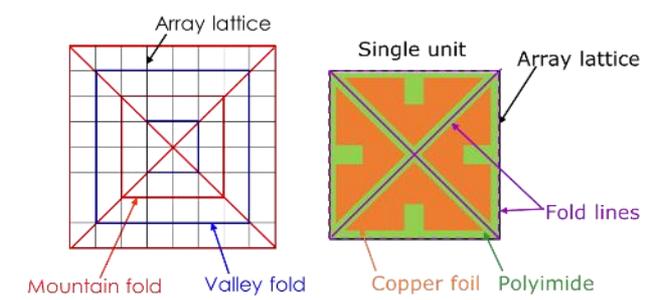


➤ 剛な基板上での非平面への対応
(Omoto, 2021)

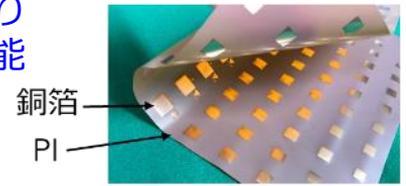
➤ フレキシブル基板での反射素子形状の工夫
(Shirane, Tomura, 2021)



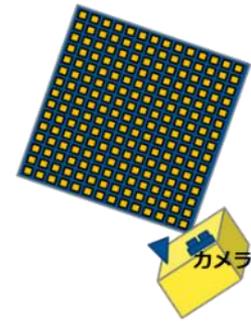
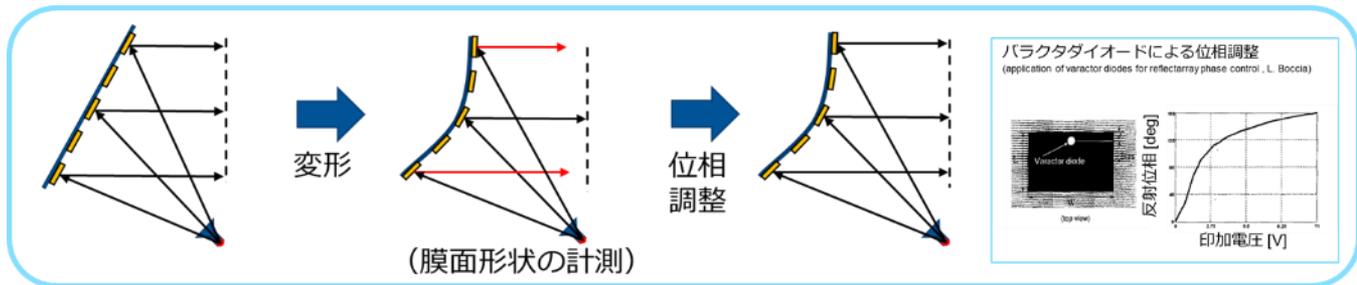
✓ バラクタダイオードを用いた位相調整により変形補償が可能



フレキシブル基板の例



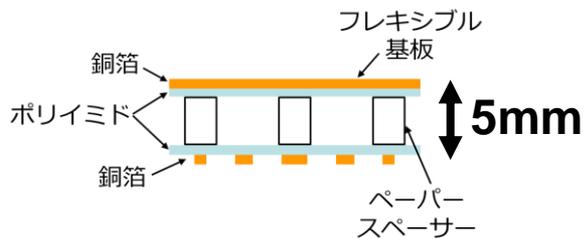
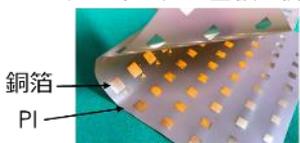
- ✓ 折り線をまたがない反射素子形状
- ✓ フレキシブル基板・ポリイミド50μm
- ✓ 平面板に張り付けアンテナ特性を確認



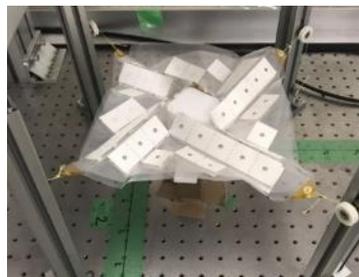
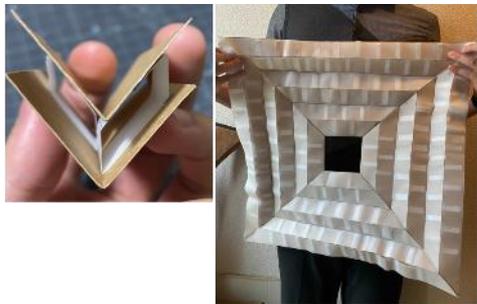
➤ 2層からなる膜構造の折り畳み (田村, 2021)

➤ 3Uキューブサットによる宇宙実証 OrigamiSat-2 (仮)

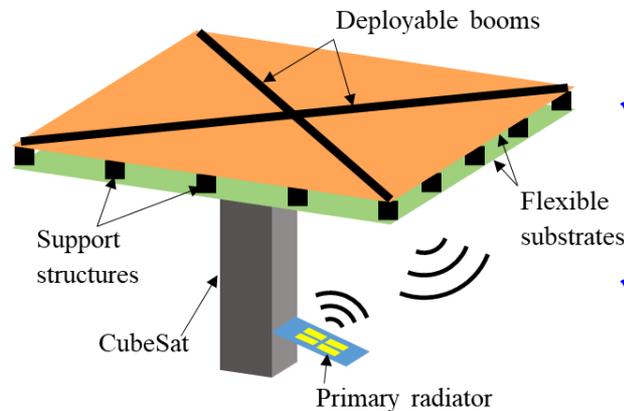
フレキシブル基板の例



✓ 誘電体層としての空隙を実現 (飛び出す絵本方式)



(永井, 2022)



✓ 非平面 展開膜
リフレクトアレー
による位相調整の
宇宙実証を目指す
✓ 現在、概念設計中

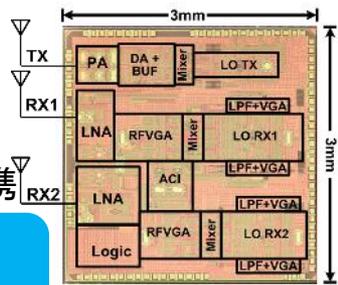
5.8GHz (C帯)
OrigamiSat-1
東工大地上局



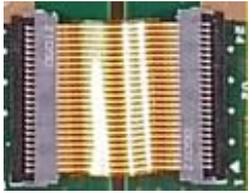
研究体制 (パッチアレーとリフレクトアレー)



フジクラ社
フレキシブル基板で連携



端末用ICで連携
ソシオネクスト社



コネクタで連携
ヒロセ電機社



東工大 白根・岡田
無線IC技術

衛星システムで連携
アクセルスペース社

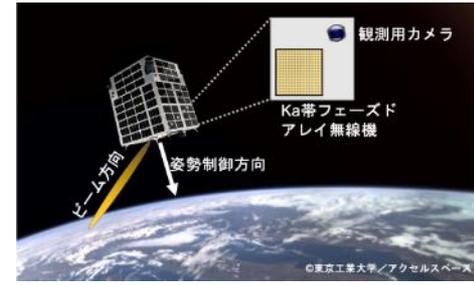
展開構造の実証機開発



サカセ・アドテック社
ウェルリサーチ社

膜構造技術
東工大 坂本

アンテナ技術
東工大 戸村

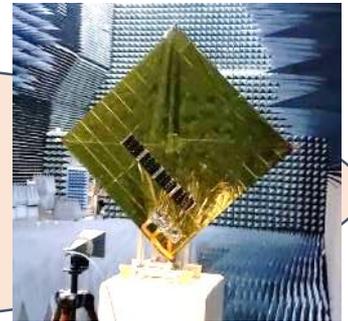
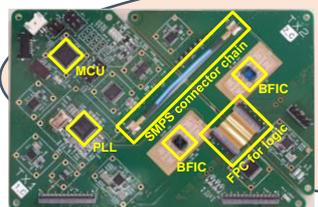


3U CubeSat OrigamiSat-1

MTTSat challenge
IEEE MTT-S

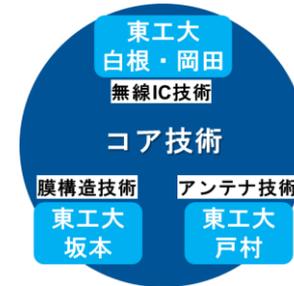
UNISEC

革新3号機
JAXA



打ち上げ機会・衛星開発の支援

主要な発表論文



非平面リフレクトアレーの位相補償 (本資料p. 5)

- K. Omoto, T. Tomura, H. Sakamoto, "Proof-of-Concept on Misalignment Compensation for 5.8-GHz-Band Reflectarray Antennas by Varactor Diodes," IEEE Access, vol. 9, 2021, pp. 54101-54108. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071090>

フレキシブル基板での反射素子形状の工夫 (本資料p. 5)

- A. Shirane, T. Tomura, H. Sakamoto, "Ultra-Lightweight Deployable Antenna Membrane Technology for Future Non-terrestrial 6G Network and Earth Observation," Small Satellite Conference, SSC21-WKIV-07, 2021. <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2021/all2021/255/>

2層展開膜の提案 (本資料p. 6)

- 田村真也, 坂本啓, 戸村崇, 「飛び出す絵本の機構を用いた宇宙展開膜面アレーアンテナ構造の提案」, 日本機械学会年次大会, No. J191-14, 2021年9月.

3UキューブサットOrigamiSat-1 (2019年打上げ) (本資料p. 3)

- K. Ikeya, H. Sakamoto, H. Nakanishi, H. Furuya, T. Tomura, et al., "Significance of 3U CubeSat OrigamiSat-1 for Space Demonstration of Multifunctional Deployable Membrane," Acta Astronautica, Vol. 173, 2020, pp. 363-377. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.04.016>
- S. Koike, et al., "Revival and Successive Operation of 3U CubeSat OrigamiSat-1 with Multifunctional Deployable Membrane," 33rd International Symposium on Space Technology and Science, 10th Nano-Satellite Symposium & 14th IAA Low-Cost Planetary Missions Conference, No. 2022-f-18, Mar. 2022. (発表予定)

ソーラー電力セイルIKAROS膜の非平面さ (本資料p. 3)

- Y. Satou, N. Okuizumi, H. Sakamoto, et al. "Nonflatness of Solar Sail Membrane Predicted by Nonlinear Finite Element Analyses," AIAA 2014-0832. Spacecraft Structures Conference. Jan. 2014. <https://doi.org/10.2514/6.2014-0832>
- N. Okuizumi, Y. Satou, O. Mori, H. Sakamoto, H. Furuya, "Analytical Investigation of Global Deployed Shape of a Spinning Solar Sail Membrane," AIAA Journal, 59:3, 2021, pp. 1075-1086. <https://doi.org/10.2514/1.J059717>